

Analisis Pengaruh *Frequency Synchronization* terhadap Performansi Sistem *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* Berbasis *Telecommunication Instructional Modelling System*

Reno Satyogana¹, Muhammad Fauzan Edy Purnomo S.T., M.T.², Ali Mustofa S.T., M.T.³

Abstract—Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) is a method to combine parallel data from high speed serial data using Phase Shift Keying or Quadrature Amplitude Modulation (QAM) with overlapping subcarrier to aim efficiently bandwidth when transmitted. Subcarrier frequency is determined using Discrete Fourier Transform (DFT).

Due to overlapping subcarrier makes OFDM system sensitive against offset by local oscillator. Thus Inter Carrier Interference (ICI) occurs cause of close frequency.

Experiment be done using Telecommunication Instructional Modelling System (TIMS) to analyze cause of offset towards OFDM performance system. Performance measured by Bit Error Rate (BER) and Signal to Noise Ratio (SNR) on first channel of OFDM.

From this experiment, when the frequency offset is 0 % BER was equal to 0.062 and SNR was equal to 47.7594 dB which these are the lowest BER and highest SNR. BER was increasing when the offset less or more than 0.1 %. SNR was decreasing when the offset close to - 0.1 % and 0.2 % due to the difference of noise power when the signal power was rising. BER was not changed by SNR on equal frequency offset. OFDM system can optimal when tolerable offset from - 0.1 % up to 0 % due to BER value and noise power in SNR was changed slightly and close to the lowest BER and highest SNR.

Keywords: *frequency synchronization, frequency offset, OFDM, TIMS*

Abstrak—Orthogonal Frequency Division Multiplexing merupakan teknik penggabungan data paralel dari data serial berkecepatan tinggi dengan modulasi *Phase Shift Keying* atau *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) dengan dengan subcarrier yang *overlapping* untuk mengefisienkan lebar pita (*bandwidth*) saat ditransmisikan. Nilai frekuensi subcarrier ditentukan dengan menggunakan *Discrete Fourier Transform* (DFT).

Subcarrier yang *overlapping* menyebabkan sistem OFDM sensitif terhadap *offset* yang timbul akibat perbedaan osilator pengirim dan penerima. Hal ini menimbulkan *Inter Carrier Interference* (ICI) karena sinyal *carrier* yang berdekatan

Penelitian dilakukan dengan memodelkan sistem OFDM berbasis *Telecommunication Instructional Modelling System* (TIMS) untuk dianalisis pengaruh *offset* yang timbul terhadap performansi sistem. Performansi diukur dengan menganalisis perhitungan *Bit Error Rate* (BER) dan *Signal to Noise Ratio* (SNR) pada kanal pertama OFDM.

Dari penelitian ini diperoleh nilai BER sebesar 0,062 dan SNR sebesar 47,7594 dB pada *frequency offset* bernilai 0 % yang mana memiliki nilai BER terendah dan SNR tertinggi. Nilai

BER meningkat pada *frequency offset* bernilai kurang atau lebih dari 0,1 %. Nilai SNR terjadi penurunan saat *frequency offset* mendekati nilai - 0,1 % dan 0,2 % akibat perubahan nilai daya *noise* namun perubahan nilai daya sinyal yang cenderung meningkat. Perubahan nilai SNR tidak mempengaruhi perubahan nilai BER pada *frequency offset* yang sama. Sistem OFDM dapat optimal dengan *frequency offset* yang ditolerir bernilai - 0,1 % hingga 0 % karena memiliki nilai BER dan daya *noise* pada SNR yang landai serta mendekati nilai BER terendah dan SNR tertinggi

Kata kunci: *frekuensi sinkronisasi, frequency offset, OFDM, TIMS*

I. PENDAHULUAN

TEKNOLOGI informasi yang semakin baik semakin dibutuhkan oleh masyarakat. Semakin banyaknya pengguna yang membutuhkan akses informasi yang cepat, semakin tinggi juga tuntutan kepada pihak penyedia layanan untuk memberikan kecepatan data yang tinggi juga andal. Penyedia layanan dalam hal ini harus dapat mengefisienkan kanal yang digunakan, sehingga diperlukan teknologi *multiplexing*.

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) merupakan teknik penggabungan (*multiplexing*) yang lebih efisien dibanding *Frequency Division Multiplexing* (FDM). Efisiensi *bandwidth* tersebut dikarenakan terjadi pemecahan data serial menjadi paralel dan kemudian ditransmisikan dengan menggabungkan subcarrier secara ortogonal pada domain frekuensi [1] sehingga terjadi *overlapping*.

Penggunaan OFDM semakin meningkat dikarenakan kecepatan dan daya yang dibutuhkan oleh perangkat pemroses data digital. OFDM digunakan pada layanan *Asymmetrical Digital Subscriber Line* (ADSL) dan *Wireless Local Area Network* (W-LAN). OFDM juga diaplikasikan pada *High Definition Digital Television* (HDTV), komunikasi optik, dan komunikasi bergerak [2].

Pada penerima terjadi proses *demultiplexing* yang mana mengembalikan sinyal yang diterima menjadi sejumlah kanal yang diparalelkan. Proses sinkronisasi frekuensi menjadi penting karena spektrum pada masing-masing subcarrier yang *overlapping* [3]. Sinkronisasi ini bertujuan agar sinyal yang diterima tidak terjadi *Inter Carrier Interference* (ICI).

Perlu adanya penelitian lebih lanjut terkait frekuensi *offset* berbasis alat pemodelan telekomunikasi, yaitu *Telecommunication Instructional Modelling System* (TIMS). Penelitian dilakukan dalam skala laboratorium. Modulasi yang digunakan adalah *Binary Phase Shift Keying* (BPSK).

¹ Mahasiswa Teknik Elektro Universitas Brawijaya, Malang.
(email: reno.satyogana@gmail.com)

² Dosen Pembimbing I Teknik Elektro Universitas Brawijaya, Malang.

³ Dosen Pembimbing II Teknik Elektro Universitas Brawijaya, Malang.

Kanal merupakan *single path*. Tidak adanya *guard interval*, *windowing*, dan *coding*. Sinkronisasi *clock* penerima diambil dari pengirim.

Penelitian akan mengkaji performansi sistem OFDM terhadap *frequency offset*. Kajian ditekankan pada besarnya nilai *Bit Error Rate* (BER) dan *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) akibat *frequency offset* pada kanal pertama OFDM.

II. TINJAUAN PUSTAKA

OFDM adalah sistem komunikasi data berkecepatan tinggi dengan menggunakan teknik *multicarrier*. Konsep dari OFDM didasarkan pada penyebaran data berkecepatan tinggi untuk ditransmisikan dengan *multicarrier* berkecepatan rendah (masing-masing disebut sebagai *subcarrier*) [4]. Antar *subcarrier* bersifat *ortogonal* dan jarak antara masing-masing frekuensi ditentukan dengan menggunakan *Discrete Fourier Transform* (DFT) [5].

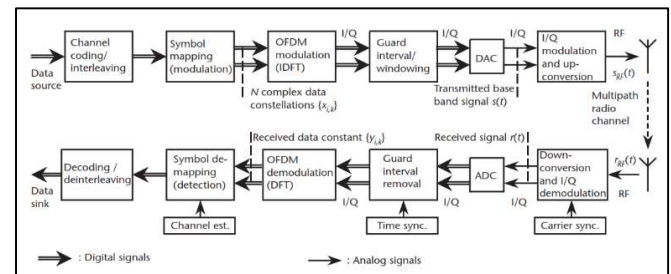
OFDM pertama kali dikenal pada sekitar tahun 1960 dan dikembangkan pada tahun 1970 dan 1980. Pada sekitar tahun 1960 teknik OFDM digunakan pada sistem militer [6], [7] dan [8]. Pada tahun 1981 OFDM diteliti [9] untuk modem berkecepatan tinggi, komunikasi bergerak digital, dan perekaman dengan kerapatan yang tinggi.

Sistem OFDM memiliki beberapa keuntungan dan kelemahan. Keuntungannya adalah: (1) OFDM yang bersifat *ortogonal* banyak digunakan untuk sistem komunikasi pita lebar nirkabel akibat spektrum yang efisien [10] dan tahan terhadap *multipath fading* [11]; (2) OFDM dapat diimplementasikan menggunakan DFT dan *Inverse Discrete Fourier Transform* (IDFT) yang mana menurunkan kompleksitas sistem [2]. Namun memiliki kerugian, yaitu: (1) OFDM sensitif terhadap *frequency offset* dan *phase noise* [4]; (2) OFDM memiliki *Peak-to-Average-Power Ratio* (PAPR) yang tinggi, yang mana cenderung mengurangi efisiensi daya pada penguat *Radio Frequency* (RF) [4].

Sistem dari OFDM ditunjukkan pada Gambar 1. Pada bagian pemancar, data diproses sebagai berikut: (1) Sumber data diproses untuk mendapatkan transmisi yang andal atau untuk mencegah kesalahan bit saat melalui kanal yang memiliki gangguan dengan menggunakan *channel coding*. *Channel coding* ini dapat memperbaiki kesalahan bit. *Forward Error Coding* (FEC) merupakan *coding* yang umum digunakan [4]; (2) Data tersebut kemudian dibagi sebanyak N kanal atau terjadi pemecahan data serial menjadi paralel dalam *symbol mapping* [4]; (3) Data paralel tersebut dimodulasikan dengan modulasi digital. *Subcarrier* yang digunakan saling *ortogonal*. *Ortogonalitas subcarrier* diatur dengan IDFT. Modulasi yang dapat digunakan adalah modulasi digital BPSK, *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK), atau *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) [4]; (4) Keluaran dari IDFT kemudian diberikan *guard interval* dan *windowing* untuk menjaga *ortogonalitas* masing-masing sinyal *carrier* dan keindependenan simbol OFDM secara *time division* [4]. *Guard interval* menambah jarak antar periode simbol serta menambahkan *cyclic prefix* (CP) pada masing-masing sinyal termulasi sebelum proses *multiplexing* untuk mencegah terjadinya *Inter Symbol Interference* (ISI) [12] Sedangkan *windowing* bertujuan untuk mengurangi daya *sidelobe* sinyal persegi keluar dari spektrum yang diinginkan; (5) Sinyal tersebut melalui *digital-to-analog converter* (DAC) sebelum ditransmisikan. Dalam DAC terjadi proses *filtering* dan perubahan sinyal digital menjadi analog [4]; (6) Sebelum ditransmisikan, sinyal analog tersebut melalui *upconverter* yang berfungsi sebagai *mixer* antara sinyal

masuk dengan RF. Hal ini bertujuan untuk mentransmisikan sinyal dengan *carrier microwave* [13].

Untuk bagian penerima, sinyal OFDM diproses sebagai berikut: (1) Sinyal yang diterima oleh antenna melalui proses *downconverter*. Proses ini bertujuan mencampurkan sinyal yang ditransmisikan, yaitu dengan *carrier microwave*, dengan osilator lokal [13]; (2) Sinyal hasil pencampuran tersebut kemudian melalui proses *analog-to-digital converter* (ADC), sehingga sinyal analog tersebut diubah menjadi digital; (3) Sinyal yang diterima kemudian dikembalikan seperti semula dengan mengambil CP pada sinyal yang disebut dengan *guard time removal*. Sinkronisasi waktu diperlukan untuk menentukan batas simbol. Kesalahan dari proses ini menyebabkan terjadinya ISI [12]; (4) Data didapatkan dengan melakukan proses DFT. Dalam proses ini juga terjadi sinkronisasi frekuensi dengan tujuan mendapatkan data pada kanal tertentu untuk diproses lebih lanjut. Kesalahan dari proses sinkronisasi ini menyebabkan ICI; (5) Pemetaan simbol berdasarkan jumlah bit yang ditransmisikan diproses pada *symbol mapping* dan terjadi perubahan data paralel menjadi serial; (6) Data serial melalui proses *decoding* untuk mengetahui data yang dikirimkan telah benar atau salah.



Gambar 1 Blok Diagram Sistem OFDM [4]

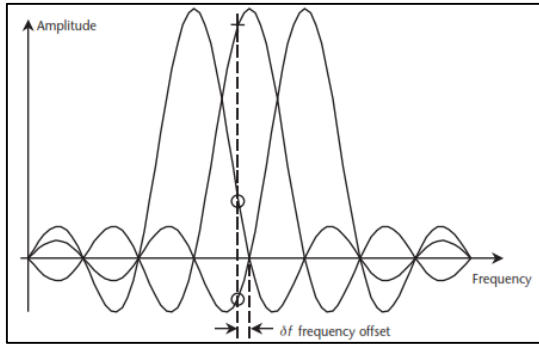
Sinkronisasi merupakan salah satu bagian yang penting pada penerima dikarenakan perbedaan waktu pada *clock* dan frekuensi pada osilator lokal yang kurang baik dapat menyebabkan penurunan performansi pada sistem. Sinkronisasi waktu digunakan untuk memilih batas dari simbol dan sinkronisasi frekuensi untuk menyamakan osilator antara penerima dengan pemancar. Sifat *ortogonal subcarrier* akan hilang dan muncul ISI dan ICI jika kedua sinkronisasi tidak dilakukan.

Kesalahan *frequency synchroninization* atau perbedaan nilai frekuensi antara osilator pengirim dengan penerima menyebabkan terjadinya *frequency offset*. Akibat dari hal ini membuat proses demodulasi oleh DFT mencuplik (*sampling*) pada posisi yang salah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Daya sinyal *carrier* pada kanal yang dicuplik menurun (“+”) dan munculnya ICI pada sinyal *subcarrier* yang berdekatan (“O”). Sehingga mengakibatkan penurunan nilai SNR [4].

Performansi OFDM dapat diukur dengan menganalisa BER dan SNR. BER merupakan probabilitas *error* pada sinyal yang diterima. BER dalam persamaan dapat ditulis [14] sebagai berikut:

$$BER = \frac{Bit_{Error}}{Bit_{Total}} \quad (1)$$

dengan Bit_{Error} adalah jumlah bit yang salah pada penerima sedangkan Bit_{Total} adalah jumlah bit yang diterima. Perhitungan dilakukan dengan kurun waktu tertentu.



Gambar 2 Timbulnya *Frequency Offset* [4]

SNR adalah rasio antara daya rata-rata sinyal informasi terhadap daya rata-rata *noise* pada sinyal [13]. Persamaan SNR adalah [15]:

$$SNR_{dB} = 10 \log \left(\frac{S}{N} \right) dB \quad (2)$$

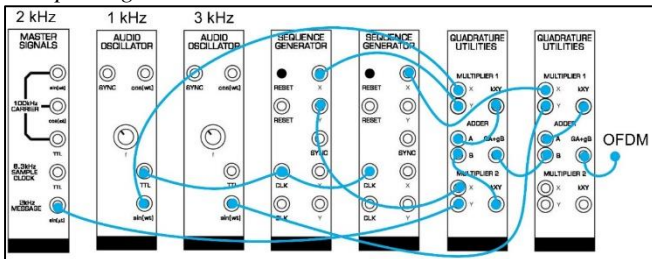
dengan S adalah daya sinyal dan N adalah daya *noise*; atau dapat ditulis dalam satuan dB [16]:

$$SNR_{dB} = level_{(signal \text{ in } dBm)} - level_{(noise \text{ in } dBm)} \quad (3)$$

SNR dapat dideteksi pada penerima secara *pre-detection* dan *post-detection*. *Pre-detection* diukur setelah filter atau sebelum sinyal yang diterima terjadi proses demodulasi untuk mengukur kualitas penerima bagian depan (*front-end receiver*). *Post-detection* SNR diukur setelah sinyal yang diterima terjadi proses demodulasi untuk mengukur kualitas data yang diterima [17].

III. PEMODELAN SISTEM

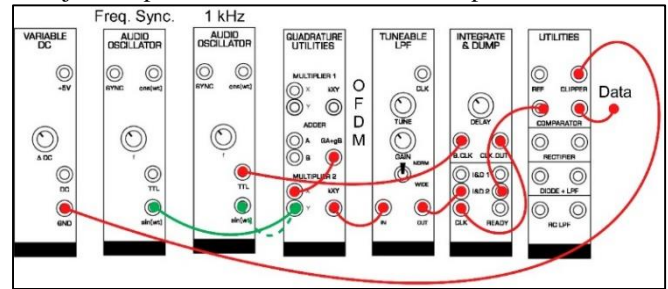
Sistem pemancar OFDM dimodelkan pada Gambar 3. Pemodelan ini menggunakan tiga kanal dengan masing-masing kecepatan 1 kbps. Modulasi yang digunakan adalah BPSK dengan frekuensi *subcarrier* pertama adalah 1 kHz, kedua adalah 2 kHz, dan ketiga adalah 3,2 kHz. Nilai *subcarrier* dipilih berdasarkan letak *null* pada spektrum sinyal BPSK 2 kHz. Ketiga kanal tersebut kemudian di-*multiplexing*.



Gambar 3 Pemodelan Sistem Pemancar OFDM.

Sinyal keluaran OFDM pada Gambar 3, diterima dengan pemodelan Gambar 4. Sistem penerima terjadi proses sinkronisasi frekuensi dan *clock*. Sinkronisasi frekuensi diteliti saat sinkronisasi secara sempurna dan saat terjadi *frequency offset*. Sedangkan sinkronisasi *clock* mengambil langsung dari pemancar. Filter yang digunakan adalah *low pass filter* (LPF) dengan *cut-off* pada frekuensi 1,2 kHz. Keluaran filter diambil sampel sebanyak 32 kali untuk memperoleh nilai SNR. Perolehan nilai BER dilakukan dengan proses integrasi pada keluaran filter dengan *delay*

24,5 μs . Hasil proses integrasi diubah menjadi digital kemudian dibandingkan dengan data yang dikirimkan. Dalam diagram alir, langkah untuk perhitungan nilai SNR ditunjukkan pada Gambar 5 dan nilai BER pada Gambar 6.



Gambar 4 Pemodelan Sistem Penerima OFDM.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN PENELITIAN

A. BER TERHADAP FREKUENSI OFFSET

Spektrum frekuensi dari pemodelan ini ditunjukkan pada Gambar 7. Dengan demikian diketahui bahwa antar *subcarrier* saling *overlapping*.

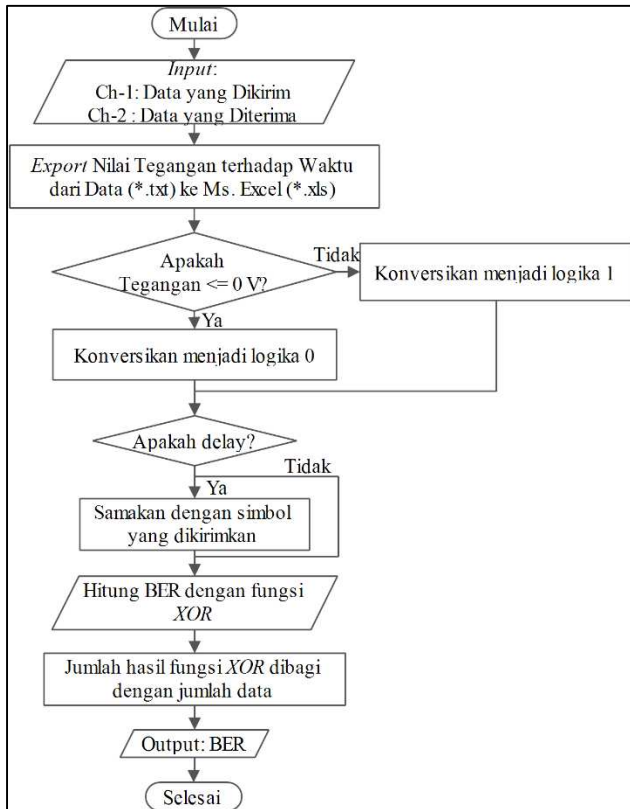
Perhitungan BER dilakukan dengan menghitung sebanyak lima sampel. Perhitungan lima sampel ini bertujuan mengurangi kesalahan yang terjadi. Perhitungan BER dapat dihitung berdasarkan persamaan 1. Pada saat terjadi *offset* sebesar -1.09 %, diperoleh bit *error* sebesar 477 bit dengan data yang diterima pada kurun waktu 1 detik adalah 1003 bit. Dihitung dengan persamaan 1 maka:

$$BER = \frac{477 \text{ bit}}{1003 \text{ bit}}$$

$$BER = 0,476$$

Nilai BER pada *offset* yang berbeda pada masing-masing sampel ditunjukkan pada Tabel 1. Data yang telah dihitung ditampilkan dalam bentuk grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.

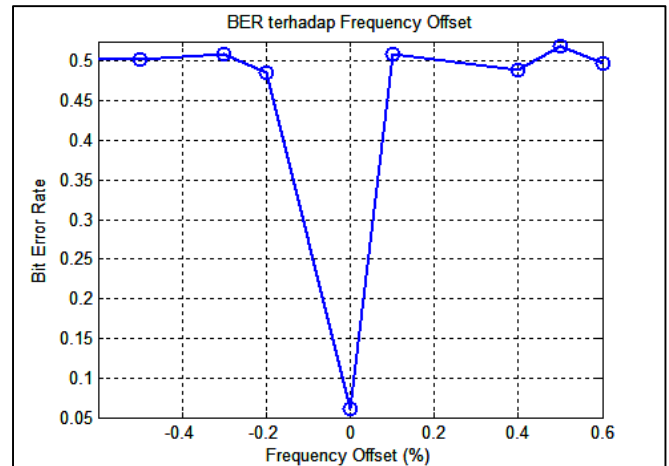
Hasil analisis diperoleh berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 1 dan Gambar 8. Didapat bahwa saat osilator penerima memiliki *frequency offset* sama dengan 0 % atau sinkron secara sempurna maka memiliki BER terendah yaitu sebesar 0,0617. Saat osilator penerima memiliki *frequency offset* kurang atau lebih dari 0,1 %, nilai BER meningkat. Performansi sistem OFDM tidak dipengaruhi *frequency offset* yang menjauhi 0 %. Performansi sistem dapat optimal dengan *frequency offset* yang ditolerir sebesar - 0,1 % sampai 0 % karena nilai BER lebih landai pada nilai tersebut.



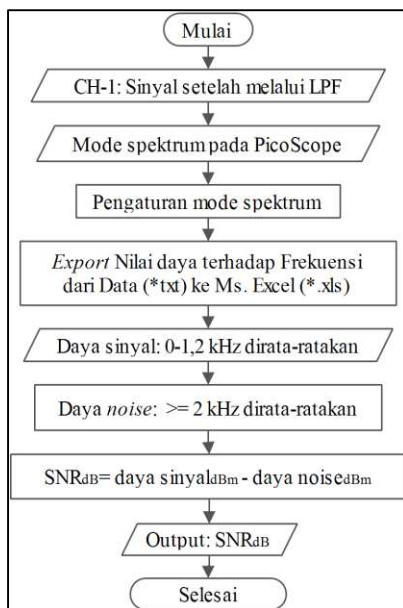
Gambar 5 Diagram Alir Perhitungan BER.

Tabel 1 Perolehan Hasil BER Terhadap *Frequency Offset*

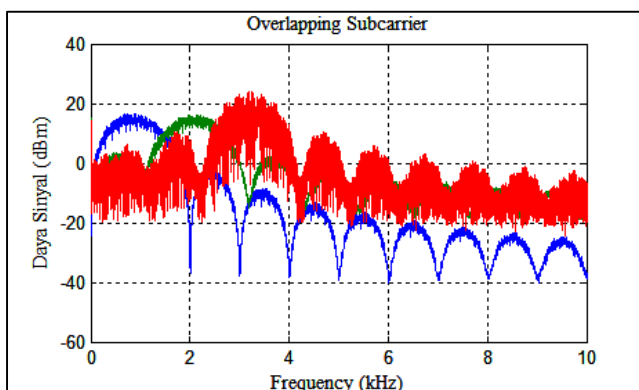
F.Offset (%)	Bit Error Rate					Avg.
	I	II	III	IV	V	
-1.09	0.476	0.478	0.504	0.463	0.552	0.495
-0.5	0.503	0.504	0.487	0.516	0.505	0.503
-0.3	0.513	0.493	0.539	0.499	0.502	0.509
-0.2	0.491	0.496	0.482	0.484	0.475	0.486
0	0.050	0.069	0.068	0.058	0.064	0.062
0.1	0.546	0.550	0.501	0.468	0.482	0.509
0.4	0.459	0.493	0.517	0.473	0.501	0.489
0.5	0.493	0.517	0.540	0.536	0.506	0.518
0.6	0.484	0.504	0.513	0.502	0.487	0.498



Gambar 8 Grafik BER Terhadap Frekuensi Offset



Gambar 6 Diagram Alir Perhitungan SNR.



Gambar 7 Subcarrier yang Saling Overlapping

B. PENGARUH FREQUENCY SYNCHRONIZATION TERHADAP SNR

Spektrum yang diterima setelah melalui *stunable* LPF diperoleh sebanyak 32 sampel. Daya sinyal tersebut dijumlahkan pada frekuensi 0 sampai 1,2 kHz, sedangkan daya *noise* dijumlahkan pada frekuensi lebih besar dari 2 kHz. Kedua daya tersebut diselisihkan sesuai dengan Persamaan 3. Pada saat terjadi *offset* sebesar -1.49 % diperoleh daya sinyal sebesar 12,3198 dBm dan daya *noise* sebesar -35,2299 dBm, dengan Persamaan 2.3, maka:

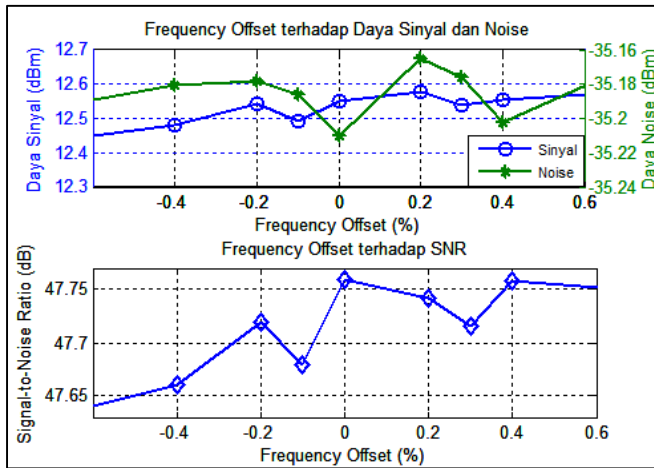
$$SNR = 12,3198dBm - (-35,2299dBm)$$

$$SNR = 47,5497dB$$

Nilai SNR pada *frequency offset* yang berbeda ditunjukkan pada Tabel 2. Data yang telah dihitung ditampilkan dalam bentuk grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.

Tabel 2 Rasio antara Daya Sinyal dan Noise terhadap *Frequency Offset*.

Offset (%)	Daya Sinyal (dBm)	Daya Noise (dBm)	SNR (dB)
-1.49	12.3198	-35.2299	47.5497
-0.40	12.4800	-35.1804	47.6603
-0.20	12.5410	-35.1785	47.7195
-0.10	12.4930	-35.1858	47.6788
0.00	12.5492	-35.2102	47.7594
0.20	12.5766	-35.1651	47.7417
0.30	12.5393	-35.1761	47.7154
0.40	12.5555	-35.2021	47.7576
0.70	12.5793	-35.1706	47.7499

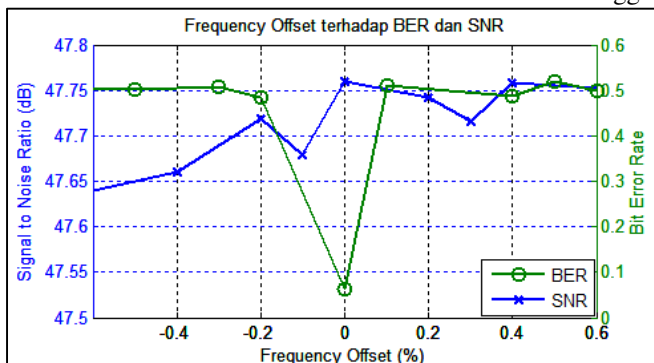


Gambar 9 Grafik SNR Terhadap Frekuensi Offset

Hasil analisis diperoleh berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 2 dan Gambar 9. Didapat bahwa daya noise terendah diperoleh saat *frequency offset* bernilai 0 % dan daya sinyal memiliki nilai yang cenderung meningkat. Daya sinyal meningkat dikarenakan pada kanal pertama OFDM tidak terdapat *subcarrier* yang *overlapping* pada frekuensi dibawah 1 kHz. Saat osilator penerima memiliki *frequency offset* sama dengan 0 % maka memiliki SNR tertinggi yaitu sebesar 47,7594 dB. Sistem OFDM dapat optimal dengan *frequency offset* yang ditolerir bernilai -0,1 % sampai 0 % karena meski memiliki nilai SNR yang curam namun memiliki daya noise yang lebih landai dan mendekati nilai SNR tertinggi.

C. ANALISIS HUBUNGAN FREQUENCY OFFSET TERHADAP NILAI BER DAN SNR

Grafik hubungan BER dan SNR terhadap frekuensi *offset* ditunjukkan Gambar 10. Dari grafik Gambar 10, Tabel 1, dan Tabel 2 diperoleh bahwa pada saat *frequency offset* sebesar 0 % diperoleh nilai SNR tertinggi dengan BER terendah. Nilai SNR tidak mempengaruhi pada *frequency offset* kurang atau lebih dari 0 %. Saat *frequency offset* bernilai -0,2 % sampai 0 % dan 0 % sampai 0,2 % terjadi penurunan nilai SNR dan peningkatan nilai BER. Sistem OFDM dapat optimal dengan *frequency offset* yang ditolerir bernilai -0,1 % hingga 0 % karena memiliki nilai BER dan daya noise pada SNR yang landai serta mendekati nilai BER terendah dan SNR tertinggi.



Gambar 10 Grafik Hubungan antara Frekuensi Offset terhadap BER dan SNR

V. KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh berdasarkan pengaruh sinkronisasi frekuensi terhadap performansi sistem OFDM pada data informasi yang dikirimkan dengan yang diterima adalah: (1) Nilai BER terendah diperoleh saat osilator penerima memiliki *frequency offset* sebesar 0 % dan terjadi

peningkatan saat *frequency offset* kurang atau lebih dari 0,1 %; (2) Nilai SNR tertinggi diperoleh saat *frequency offset* sama dengan 0 % dengan daya noise terendah diperoleh saat *frequency offset* bernilai 0 % dan daya sinyal memiliki kecenderungan meningkat saat *frequency offset* terjadi; (3) Nilai BER tidak dipengaruhi perubahan nilai SNR, sistem OFDM dapat optimal dengan *frequency offset* yang ditolerir bernilai -0,1 sampai 0 %.

Berdasarkan pada hasil penelitian yang telah dilakukan, adapun saran yaitu: (1) Pada sistem OFDM disarankan untuk memiliki sinkronisasi dengan *error* kurang dari 0,1 % atau *frequency offset* memiliki perbedaan dibawah 0,5 Hz untuk mengetahui performansi sistem secara detail; (2) Pada sistem OFDM disarankan menggunakan *bandpass filter* untuk mengurangi *sidelobe* yang timbul; (3) Pengembangan penelitian dapat dilakukan dengan menganalisis performansi sistem OFDM terhadap kesalahan sinkronisasi *bit clock* dan periode *delay* pada *integrate & dump*, menganalisis ortogonalitas *subcarrier* terhadap sinkronisasi frekuensi, menganalisis perbedaan daya sinyal pada masing-masing *subcarrier*, dan menganalisis pengaruh modulasi yang digunakan pada sistem OFDM.

REFERENSI

- [1] Athaudage, C. R. N. dan A. D. S. Jayalath. 2004. Delay Spread Estimation using Cyclic-Prefix in Wireless OFDM Systems. *IEEE Proc-Commun.* Vol. 151 (6): 559 – 566.
- [2] Xiong, Furqin. 2006. *Digital Modulation Techniques*, second edition. London: Artech House.
- [3] Weeraddana, P.C., Nandana Rajatheva, dan H. Minn. 2009. Probability of Error Analysis of BPSK OFDM System with Random Residual Frequency Offset. *IEEE Transactions on Communications.* Vol. 57 (1): 106 – 116.
- [4] Prasad, Ramjee. 2004. *OFDM for Wireless Communication System*. London: Artech House.
- [5] Hara, Shinsuke dan Ramjee Prasad. 2003. *Multicarrier Techniques for 4G Mobile Communications*. London: Artech House.
- [6] Mosier, R.R., dan R.G. Calubaugh. 1958. Kineplex, a Bandwidth Efficient Binary Transmission System. *AIEE Trans.*, Vol. 76: 723 – 728.
- [7] Zimmerman, M.S. dan A.L. Kirsch. 1967. The AN/GSC-10 (KATHRYN) Variable Rate Data Modem for HF Radio. *IEEE Transactions on Communications.* Vol. COM-15: 197 – 205.
- [8] Porter, G. C. 1968. Error Distribution and Diversity Performance of a Frequency Differential PSK HF Modem. *IEEE Transactions on Communications.* Vol. COM-16: 567 – 575.
- [9] Schimdt, Jorge F. 2013. Choose Your Subcarriers Wisely: Active Interference Cancellation for Cognitive OFDM. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems.* Vol. 3 (4): 615-625.
- [10] Liu, Hui dan Guoqing Li. 2005. *OFDM-Based Broadband Wireless Networks: Design and Optimization*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [11] Schimdt, Jorge F. 2013. Choose Your Subcarriers Wisely: Active Interference Cancellation for Cognitive OFDM. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems.* Vol. 3 (4): 615-625.
- [12] Ergen, Mustafa. 2009. *Mobile Broadband Including WiMAX and LTE*. New York: Springer Science + Business Media.
- [13] Laplante, Philip A et al. 2000. *IEEE Dictionary*. Florida: CRC Press LLC.
- [14] Hui, Rongqing dan Maurice O'Sullivan. 2009. *Fiber Optic Measurement Techniques*. London: Elsevier Inc.
- [15] Smille, Graham. 1999. *Analog and Digital Communication Techniques*. Massachusetts: Newnes.
- [16] Freeman, Roger L. 1999. *Fundamentals of Telecommunications*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [17] Haykin, Simon dan Michael Moher. 2007. *Introduction to Analog and Digital Communications, Second Edition*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

